



totale certaines tumeurs ou, en cas de cancers trop diffus ou trop invasifs, éliminer un plus grand nombre de tumeurs et améliorer ainsi la vie du patient. De plus, il raccourcit les protocoles opératoires, donc minimise l'anesthésie et la perte de sang. Des interventions qui auraient été trop risquées il y a quelques années, sont aujourd'hui possibles.

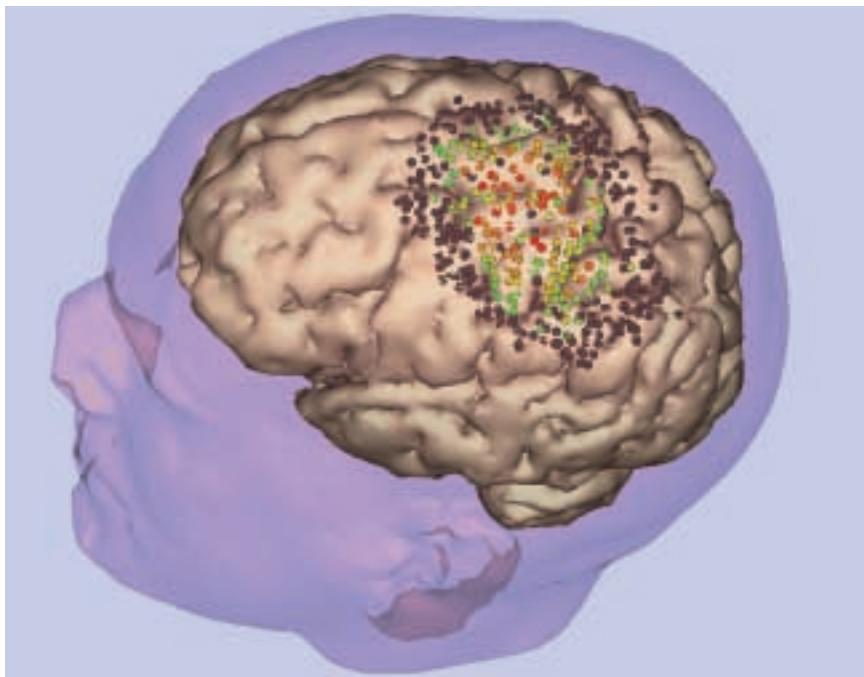
Visitions l'envers du décor et découvrons les principales techniques utilisées. La première étape est la construction, non invasive, d'une représentation en trois dimensions de la surface et de l'anatomie interne de la partie du corps ou du volume à traiter.

La construction du modèle

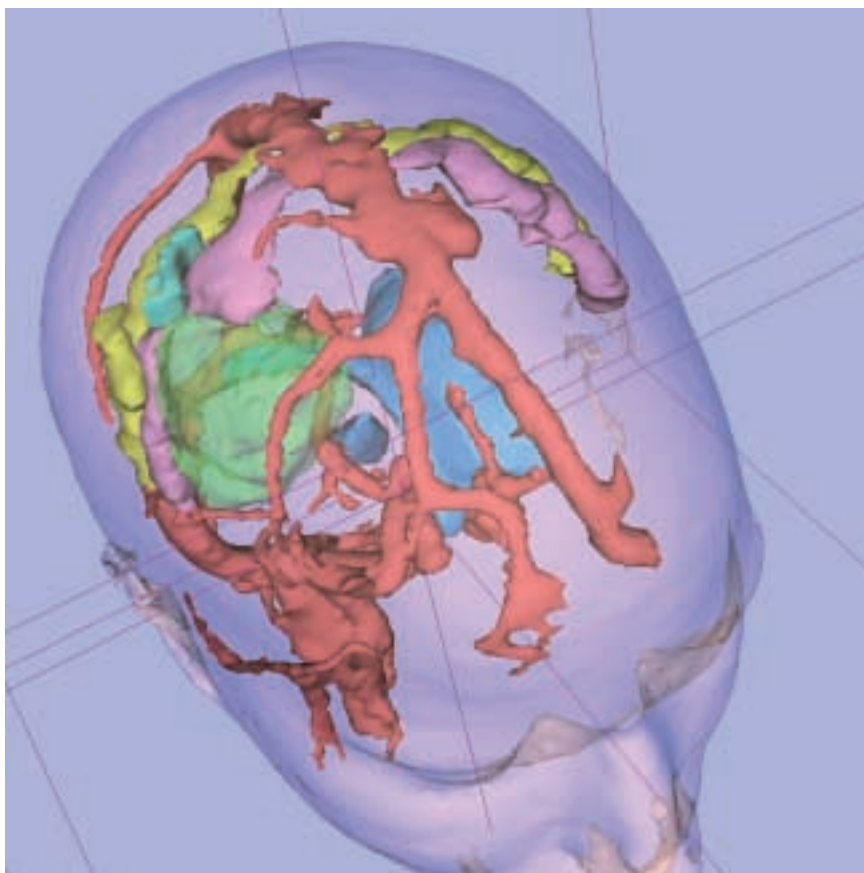
Quand on irradie le corps à l'aide de rayons X, ceux-ci sont différemment absorbés par les os et par les organes. Ainsi, certaines zones apparaissent plus foncées que d'autres sur la plaque radiographique. Cependant, l'image est plane : des structures tridimensionnelles, principalement les os, sont projetées en deux dimensions.

En revanche, le scanner et l'imagerie par résonance magnétique nucléaire fournissent une série de coupes virtuelles à des profondeurs déterminées (voir le bandeau en haut de l'article). Le médecin dispose de centaines de coupes minces, dont chacune peut être visualisée individuellement. Stockées dans la mémoire d'un ordinateur, elles se combinent en un modèle tridimensionnel où chaque point est défini par un numéro de ligne et un numéro de colonne sur une coupe et par le numéro de la coupe. L'imagerie par résonance magnétique distingue mieux les diverses structures anatomiques. Mesurant les réactions de l'organisme à des champs magnétiques, elle évite en outre l'exposition des patients à des rayonnements ionisants.

Dans le champ magnétique constant qui est appliqué par les deux anneaux, certains protons (chargés positivement, ces particules constituent, avec les neutrons, les noyaux des atomes) tournent sur eux-mêmes à la façon de toupies. Les impulsions d'un second champ magnétique dévient l'axe de rotation des protons, qui retrouve progressivement son orientation initiale, à la fin de l'impulsion : on mesure l'énergie libérée lors de ce retour afin de



Michael Leventon



Arya Nabavi et Alexandra V. Chabrier, Brigham and Women's Hospital ; David Gering, MIT

4. LA CARTOGRAPHIE FONCTIONNELLE révèle les zones corticales qui commandent des muscles spécifiques. On obtient ces images à l'aide d'un dispositif, qui envoie des impulsions électriques inoffensives en des points précis du cerveau, et d'électrodes réparties sur l'ensemble du corps, qui indiquent quels muscles sont activés. Dans le cerveau (*en haut*), les points indiquent les centres qui commandent des réactions fortes (*en rouge*), moyennes (*en orange et en jaune*), faibles (*en vert*) et nulles (*en marron*) des muscles de la main droite. On peut fusionner les cartes fonctionnelles avec des modèles structuraux. Dans le cerveau d'une personne atteinte d'un cancer (*en bas*), une partie du cortex moteur (*en rose et en turquoise*) a été déplacé par la tumeur (*en vert*).



connaître la densité de protons en rotation dans les tissus. Puis, comme les divers tissus contiennent des densités de protons différentes (selon qu'ils ont plus ou moins d'eau, par exemple), on distingue des zones sur les images. Plus un tissu émet d'énergie, plus il apparaît clair sur l'image qui est calculée par l'appareil.

Après la combinaison des coupes en deux dimensions – qui forme le modèle complet en trois dimensions –, on effectue une «segmentation», c'est-à-dire que chaque volume élémentaire du modèle est regroupé avec les éléments analogues de son voisinage. Les groupes ainsi constitués

sont les structures anatomiques : les tissus adipeux et osseux, les vaisseaux sanguins, la peau, les ventricules (cavités remplies de liquide), le liquide céphalo-rachidien, les matières grise et blanche... L'ordinateur caractérise automatiquement les éléments de volume en fonction de leur brillance : le crâne et les ventricules sont souvent des structures évidentes identifiées immédiatement.

Cependant, les frontières irrégulières sont ambiguës. Par exemple, l'ordinateur trouve parfois difficilement la limite entre la matière grise, dans le cortex cérébral, et la matière blanche, sous-jacente, ou entre une tumeur et le

tissu normal. Pour résoudre ce problème, plusieurs équipes ont inventé de nouveaux algorithmes d'interprétation des intensités ambiguës.

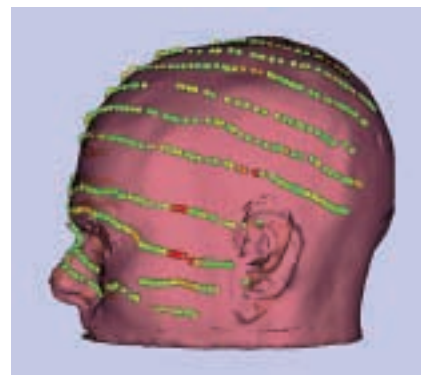
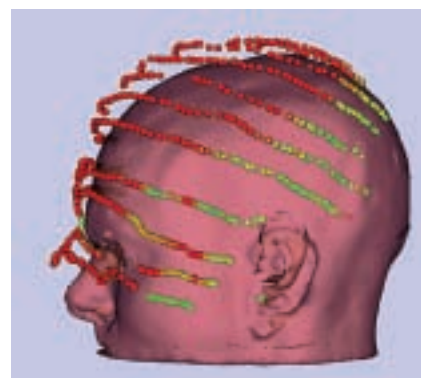
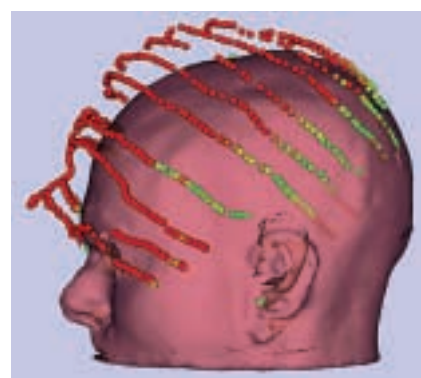
Tout d'abord, on sélectionne manuellement quelques éléments de volume qui appartiennent clairement à un tissu et l'on enregistre leurs intensités. Ainsi, chaque tissu est caractérisé par un intervalle de densités. L'ordinateur examine ensuite la brillance des autres éléments et les attribue aux tissus qui leur ressemblent le plus.

Un autre algorithme, créé par notre collègue William Wells, valide les attributions en corrigeant les variations des champs magnétiques émis



Michael Leventon

5. UN MASQUE DE LUMIÈRE LASER (lignes rouges) identifie les contours du visage d'une patiente allongée sur la table d'opération (à gauche). Un ordinateur effectue des rotations et des translations



du modèle (à droite) jusqu'à ce que les contours du visage virtuel et du masque laser soient parfaitement alignés : le modèle informatique correspond alors à l'image réelle du cerveau.



par l'aimant : la quantité d'énergie reçue varie d'une partie de la zone scannée à une autre, de sorte que certains éléments de volume apparaissent plus brillants ou plus sombres qu'ils ne devraient l'être, et ils conduisent à une mauvaise classification des tissus.

Le programme de W. Wells commence par engendrer une liste des intensités qui devraient être celles des divers tissus si l'impulsion magnétique était uniforme. Puis il compare l'intensité de chaque élément d'image à la liste et, chaque fois que cela est possible, détermine son type cellulaire. Lorsque l'intensité est à l'extérieur d'un intervalle d'énergie, mais assez proche, le programme admet provisoirement que le type de tissu est celui de l'intervalle voisin. Il estime alors l'erreur de champ magnétique en calculant la différence entre les intensités réelles et les valeurs prédites, et il ajuste les intensités, recommence l'étape de classement des éléments de volume et effectue les corrections nécessaires. Il répète ces étapes jusqu'à obtenir une caractérisation de tous les éléments de volume.

Toutefois, les tissus sont indiscernables à partir de leur seule intensité de résonance magnétique. Par exemple, la matière blanche du cerveau et les muscles du cou, qui ont parfois une composition moléculaire similaire, correspondent à des intervalles de densités identiques. Un autre logiciel évite cette confusion : il utilise un atlas d'anatomie numérisé et prédit les positions générales de différentes structures. Si l'ordinateur trouve une zone qui est soit de la matière blanche, soit du muscle, dans une partie du corps qui ne contient pas de muscle, il conclut que le tissu est de la matière blanche. Enfin, le radiologue contrôle les segmentations sur un écran et valide la caractérisation définitive des tissus.

Des détails complémentaires

Lorsque chaque élément d'image est ainsi caractérisé par son type tissulaire, d'autres programmes délimitent les tissus par des couleurs différentes. Par exemple, nous représentons les vaisseaux sanguins en rouge, les ventricules en bleu et les tumeurs en vert.

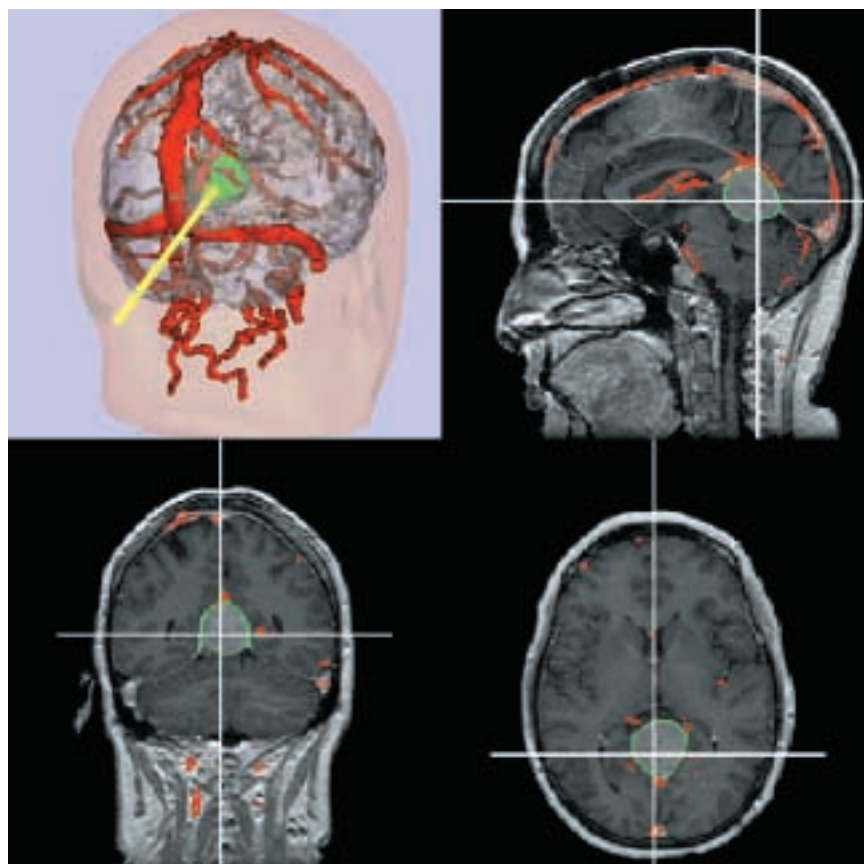
Toutefois, bien que très utile, la segmentation standard ne fournit pas

toutes les informations anatomiques et physiologiques indispensables. D'autres astuces algorithmiques sont nécessaires.

Par exemple, alors que l'imagerie par résonance magnétique classique ne le permet pas, comment délimiter avec netteté les vaisseaux sanguins ? L'équipe chirurgicale dresse une carte des vaisseaux sanguins, nommée angiogramme, en réglant le système d'imagerie pour qu'il détecte spécifiquement les liquides en mouvement (le sang). L'angiogramme ainsi obtenu est superposé aux premiers clichés d'imagerie par résonance magnétique en un modèle tridimensionnel que notre système d'enregistrement automatique optimise en cherchant la meilleure façon d'effectuer des translations et des rotations d'un ensemble de données par rapport à l'autre. Le programme exploite un concept mathématique nommé information mu-

tuelle, où des régions sont alignées en fonction de la quantité d'informations qu'elles contiennent. Par exemple, des zones qui présentent une grande diversité de textures sont superposées avec des régions également riches en informations, tandis que les zones d'intensité uniforme sont associées à d'autres régions pauvres en informations.

Des régions corticales essentielles, tel le cortex moteur, ne se distinguent pas des autres types de cortex : l'intensité des signaux et l'aspect sont identiques. Pour les différencier, deux méthodes non invasives existent. Lorsqu'un muscle fonctionne, le sang afflue dans la région du cortex qui commande ce muscle : l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle détecte ces variations et permet de cartographier le cortex. Par ailleurs, nous avons conçu, avec le service d'anesthésie de l'Hôpital Brigham et Women



6. UNE SONDE révèle la trajectoire et la position exactes du scalpel pendant l'opération. Cette sonde comporte une extrémité stérile que le chirurgien applique sur les tissus opérés ; la position de la sonde est identifiée par trois caméras fixes, qui détectent le faisceau infrarouge émis par la sonde. L'ordinateur affiche souvent le modèle tridimensionnel et des coupes transversales en deux dimensions du cerveau vu de côté, du dessus et de l'arrière. La pointe de flèche jaune sur le modèle en trois dimensions et les intersections des axes sur les autres images indiquent la pointe de la sonde. La tumeur est en vert, et les vaisseaux sanguins en rouge.

Michael Levitt